第 51 卷 第 3 期：1339-1350 高电压技术 Vol.51, No.3: 1339-1350
2025 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241252

考虑调峰-备用-爬坡-惯量多应用价值的大规模先进压缩空气储能多阶段优化规划

王佳旭[1,2]，苗世洪[1,2]，王廷涛[1,2]，姚福星[1,2]，谭昊宇[1,2]，王佰盛[1,2]
（1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学)，武汉 430074;
2. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074）

摘　要：先进压缩空气储能(advanced compressed air energy storage，A-CAES)具有大容量、非补燃、寿命长、比投资小等突出优势，已成为最具潜力与发展前景的新型储能技术之一。为充分挖掘 A-CAES 潜能，并提升其优化规划的合理性，提出了一种考虑调峰-备用-爬坡-惯量多应用价值的大规模 A-CAES 多阶段优化规划策略。首先，考虑新能源与负荷增长进程，提出大规模 A-CAES 多阶段优化规划架构与流程；其次，研究 A-CAES 在削峰填谷、事故备用、灵活爬坡、惯量支撑等方面的应用价值及运行特性，最后，以多阶段经济价值与多尺度功效价值为需求导向，将上述运行特性映射为规划边界，构建大规模 A-CAES 多阶段优化规划模型。基于改进 IEEE-118 节点系统开展算例分析，结果表明：所提策略能够充分考虑大规模 A-CAES 多应用价值进行配置，避免因超前投资与粗略估计造成的储能资源冗余。

关键词：先进压缩空气储能；多阶段规划；变工况特性；高比例新能源；多应用价值

Multi-stage Optimization Planning of Large-scale A-CAES with Consideration of Multi-application Values Including Peak Regulation, Backup, Ramping and Inertia

WANG Jiaxu[1,2], MIAO Shihong[1,2], WANG Tingtao[1,2], YAO Fuxing[1,2], TAN Haoyu[1,2], WANG Baisheng[1,2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract：Advanced compressed air energy storage (A-CAES) has emerged as one of the most promising new energy storage technologies due to its distinctive advantages such as large capacity, non-supplementary firing, long lifespan, and low specific investment. To fully exploit the potential of A-CAES and enhance the rationality of its optimal planning, a multi-stage optimization planning strategy for large-scale A-CAES considering its multi-application values in peak shaving, reserve, ramping, and inertia support is proposed. Firstly, the growth trends of new energy and load demand are taken into consideration, then a framework and process for multi-stage optimization planning of large-scale A-CAES are established. Secondly, the application values and operational characteristics of A-CAES in peak shaving, emergency reserve, flexible ramping, and inertia support are investigated. Finally, guided by the multi-stage economic and multi-scale effectiveness values, these operational characteristics are mapped into planning boundaries to construct a multi-stage optimization planning model for large-scale A-CAES. Case studies based on the modified IEEE-118-bus system demonstrate that the proposed strategy can fully consider the multi-application values of large-scale A-CAES for allocation, thereby avoiding energy storage resource redundancy caused by over-investment and rough estimation.

Key words：advanced compressed air energy storage; multi-stage planning; off-design characteristics; high proportion of new energy; multi-application values

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFB2406500)。
Project supported by National Key R&D Program of China(2023YFB2406500).

0 引言

随着新型电力系统建设的加速推进，以风电、光伏为代表的新能源装机容量不断攀升，截至 2024 年 3 月底，全国风光装机容量已突破 11 亿 kW，占比 37.3%[1]。然而，高比例新能源接入给电力系统安全稳定运行带来了严峻挑战，大力发展新型储能是保障新能源消纳与供电可靠性的关键手段[2]。在诸多储能技术中，压缩空气储能(compressed air energy storage，CAES)技术及示范工程的成功应用，使得该技术得到广泛关注与推广，在国家能源局发布的“新型储能试点示范项目名单”中，压缩空气储能项目共计 11 项[3]，压缩空气储能已成为最具潜力与发展前景的新型储能技术之一。

为克服传统 CAES 依赖化石燃料、电-电转换效率较低等弊端，先进压缩空气储能(advanced compressed air energy storage，A-CAES)应运而生，目前，山东肥城 300 MW 级先进压缩空气储能国家示范电站并网发电成功，国内多个压缩空气储能项目均计划建设总装机容量超 1 000 MW 的大规模 A-CAES 基地，压缩空气储能技术发展将呈现出清洁化、规模化、高效化的特点[4-5]。在此背景下，进一步挖掘 A-CAES 多应用价值，研究大规模 A-CAES 优化规划策略，对于保障新型电力系统安全、优质、经济运行具有重要意义[6]。

准确量化压缩空气储能系统的经济成本与效益对于压缩空气储能的优化规划及推广应用至关重要。文献[7]面向垄断型电力系统，对 A-CAES 电站的经济效益进行量化分析，效益来源包括节能减排、提供辅助服务等方面；文献[8]考虑 A-CAES 为微电网提供削峰填谷与紧急备用服务，建立了经济效益评估模型，体现了 A-CAES 在调峰、备用方面的优势；文献[9]提出了 CAES 规划-运营双层评价框架，对 CAES 在城市综合能源系统中的经济成本与效益进行了评估，凸显了 A-CAES 在高比例新能源接入背景下的重要性与价值；文献[10]计及源荷双侧不确定性，构建了风电场和 A-CAES 电站联合系统的经济效益计算模型，分析了系统投资成本、电力不足成本和电力销售收入等因素对系统经济性的影响；文献[11]提出了一种火电-CAES 耦合的多能联供系统，构建了热力分析及经济性分析模型，量化分析了 CAES 关键参数对经济性指标的影响规律。上述文献针对不同应用场景开展 CAES 经济性分析研究，具有很好的理论参考价值。然而，现有研究中压缩空气储能所提供的服务多局限于调峰，未能深入挖掘 A-CAES 在调峰、备用、爬坡、惯量支撑与一次调频等方面的应用价值，亟需针对大规模 CAES 多应用价值及相应特性开展分析。

在经济性分析的基础上，有学者进一步面向电力系统的 A-CAES 优化规划策略开展研究。文献[12]提出了一种计及经济性-可靠性多目标协同优化的 A-CAES 双层规划模型，有效降低了电力系统断供成本；文献[13]分析了调度计划对 A-CAES 寿命的影响机理，据此建立了考虑变寿命特性的 A-CAES 容量规划模型，获得了更准确的规划结果与预期效益；文献[14]构建了一种集中-分布式 CAES 电站运行框架，并提出了相应的优化规划策略，在效益提升方面优于线路扩容、增建发电机组、安装电化学储能等方案；文献[15]考虑 A-CAES 的热电联供特性，提出了一种考虑多热源协同互补的 A-CAES 系统容量配置方法，规划结果既能降低供热期弃风，也可对燃煤机组进行清洁替代。上述文献面向电力系统开展 A-CAES 优化规划研究，具有一定的借鉴意义。但存在以下问题，一是现有文献大多考虑某一容量等级进行单阶段规划，鲜有面向大规模多容量等级 A-CAES 群的多阶段规划策略研究；二是现有文献在优化规划过程中一般仅面向设计工况，对 A-CAES 的变工况特性与备用特性考虑较为粗糙；三是鲜见文献面向高比例新能源接入背景，计及 A-CAES 的灵活爬坡、惯量支撑与一次调频能力。

在实际优化规划过程中，新能源接入比例与负荷需求逐年增长，若仅考虑某一阶段下电力系统的调节需求，将会造成配置资源的浪费或不足。与电化学储能不同，由于受到运行状态、功率边界、动态特性等多方面因素的影响，A-CAES 出力呈现出明显的变工况特性，备用调节区间亦不连续[16]。此外，A-CAES 发电特性类似于燃气轮机，充电特性类似于大型电动机，在灵活爬坡、惯量支撑方面具有显著优势。在此背景下，有必要结合新能源与负荷发展进程，全面理清 A-CAES 多应用价值，建立能够满足电力系统调节需求的 A-CAES 多阶段优化规划模型，提升高比例新能源电力系统的运行经济性与可靠性。

针对上述问题，本文提出了一种考虑调峰-备用-爬坡-惯量多应用价值的大规模 A-CAES 多阶段优化规划策略。首先，考虑新能源与负荷发展进程，

建立大规模 A-CAES 多阶段优化规划架构与流程；其次，以全寿命周期经济性成本最小为目标，建立计及调峰、备用、爬坡、惯量支撑、一次调频等应用价值的大规模 A-CAES 多阶段规划模型。最后，基于改进 IEEE-118 节点系统进行算例分析，验证了所提策略的有效性。

1　多阶段优化规划架构及流程

本文考虑新能源接入比例与负荷需求增长，提出如图 1 所示大规模 A-CAES 多阶段优化规划架构。由图 1 可知，根据源荷发展情况，将 A-CAES 的规划周期分为 N 个阶段，并将建设序列记为 S，将 A-CAES 接入点序列记为 G，其表达式分别为：

$$S=\{S_1,S_2,\cdots,S_i,\cdots,S_N\} \tag{1}$$

$$G=\{G_1,G_2,\cdots,G_j,\cdots,G_M\} \tag{2}$$

式中：S_i 表示建设的第 i 个阶段；G_j 表示第 j 个接入点；M 表示可建设地理点个数。

大规模 A-CAES 多阶段优化规划以工程全寿命周期总成本最低为目标，得到配置结果，对应的配置状态变量集合记为 $\boldsymbol{V}$，其表达式为：

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_{1,1} & \cdots & \boldsymbol{V}_{1,j} & \cdots & \boldsymbol{V}_{1,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{V}_{i,1} & \cdots & \boldsymbol{V}_{i,j} & \cdots & \boldsymbol{V}_{i,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{V}_{N,1} & \cdots & \boldsymbol{V}_{N,1} & \cdots & \boldsymbol{V}_{N,M} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：向量 $\boldsymbol{V}_{i,j}=[V_k^{i,j}]_{1\times K}$ 表示 S_i 阶段 G_j 点的配置状态，其中 $V_k^{i,j}$ 表示 S_i 阶段 G_j 点新增配置 k 型机组的台数，k=1、2、…、K(待选机组共 K 种)。

大规模 A-CAES 优化规划流程如附录 A 图 A1 所示。首先，输入拓扑情况、源荷数据、多容量等级 A-CAES 设备参数等信息；其次，基于运行模拟进行 A-CAES 多应用需求量化分析；最后，面向多应用场景进行大规模 A-CAES 优化规划，得到最终的优化方案。其中，多阶段优化规划思路为：首先，在 S_1 阶段(规划初期)，确定 $\{\boldsymbol{V}_{1,1},\cdots,\boldsymbol{V}_{1,j},\cdots,\boldsymbol{V}_{1,M}\}$ 的配置状态，以满足 S_1 阶段的调节需求；进而，在 S_2 阶段，确定 $\{\boldsymbol{V}_{2,1},\cdots,\boldsymbol{V}_{2,j},\cdots,\boldsymbol{V}_{2,M}\}$ 的配置状态，以满足 S_2 阶段的调节需求；以此类推，直至最后一个规划阶段 S_N。

2　A-CAES 多应用价值及特性分析

本文重点考虑 A-CAES 的 4 类应用价值，分别为调峰、事故备用、灵活爬坡、惯量与一次调频价值，4 者按时间尺度逐级递减，如表 1 所示。针对 4 类应用价值开展特性分析，并将其以约束条件的形式映射为大规模 A-CAES 规划边界。

2.1　调峰应用价值

A-CAES 电站中的压缩机、膨胀机通常采用多级运行模式，在大规模 A-CAES 电站并网后，A-CAES 压缩机/膨胀机等熵效率随着负荷率的变化而变化，呈现出明显的变工况特性，对调峰价值影响较大[8]，考虑变工况特性后的 A-CAES 电站压缩功率与发电功率的计算式为：

$$P_t^{\mathrm{C,c}}\eta_t^{\mathrm{c}}=\dot{m}_t^{\mathrm{c}}\frac{\lambda}{\lambda-1}R_{\mathrm{g}}\sum_{k=1}^{n_{\mathrm{c}}}T_k^{\mathrm{c}}((\beta_k^{\mathrm{c}})^{\frac{\lambda}{\lambda-1}}-1) \tag{4}$$

$$P_t^{\mathrm{C,g}}=\eta_t^{\mathrm{g}}\dot{m}_t^{\mathrm{g}}\frac{\lambda}{\lambda-1}R_{\mathrm{g}}\sum_{l=1}^{n_{\mathrm{g}}}T_l^{\mathrm{g}}(1-(\beta_l^{\mathrm{g}})^{\frac{\lambda}{\lambda-1}}) \tag{5}$$

式中：$P_t^{\mathrm{C,c}}$、$P_t^{\mathrm{C,g}}$ 分别表示 A-CAES 电站在时段 t 对外输出的压缩功率与发电功率；η_t^{c}、η_t^{g} 分别表示压缩过程、发电过程的等熵效率，2 者分别为压缩机、膨胀机负荷率的函数，均为变量；$\dot{m}_t^{\mathrm{c}}$、$\dot{m}_t^{\mathrm{g}}$ 分别表示时段 t 流入压缩机、膨胀机的流量；λ 表示空气的比热比；R_{g} 表示理想气体常数；n_{c}、n_{g} 分

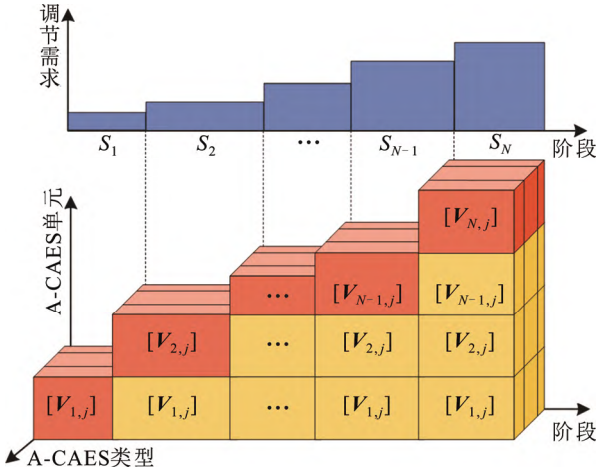

图 1　大规模 A-CAES 多阶段优化规划架构

Fig.1　Architecture of multi-stage optimization planning for large-scale A-CAES

表 1　A-CAES 多应用价值

Table 1　Multi-application values of A-CAES

价值体现	时间尺度	能力映射
调峰	小时级	大规模能量吞吐
事故备用	15 min 级	大规模能量吞吐/快速功率调节
灵活爬坡	5 min 级	大规模能量吞吐/快速功率调节
惯量与一次调频	秒级	快速功率调节

别表示压缩机、膨胀机级数；T_k^{c} 表示进入第 k 级压缩机的空气温度；β_k^{c} 表示第 k 级压缩机的额定压缩比；T_l^{g} 表示进入第 l 级膨胀机的空气温度；β_l^{g} 表示第 l 级膨胀机额定膨胀比。

在实际工程中，大容量压缩空气储能机组在压缩阶段采用多列并联运行方式[17]，当单台压缩机的可调范围不同时，A-CAES 电站的压缩功率可调区间也将变化，具体分析详见附录 A。

2.2 事故备用价值

A-CAES 电站通常能够在 15 min 内完成满压缩功率到满发电功率的切换，综合考虑运行状态、功率边界等影响，A-CAES 事故备用价值表达如下文所述。

(1)压缩工况

$$R_t^{\mathrm{C,e}} \in \left\{x \mid 0 \le x \le P_t^{\mathrm{C,c}} - P_{\min}^{\mathrm{C,c}}\right\} \cup \left\{x \mid x = P_t^{\mathrm{C,c}}\right\} \cup \left\{x \mid P_t^{\mathrm{C,c}} + P_{\min}^{\mathrm{C,g}} \le x \le P_t^{\mathrm{C,c}} + P_{\max}^{\mathrm{C,g}}\right\} \tag{6}$$

式中：$R_t^{\mathrm{C,e}}$ 为 A-CAES 电站在时段 t 提供的事故备用容量；x 为辅助变量；$P_{\min}^{\mathrm{C,c}}$ 为 A-CAES 电站最小压缩功率；$P_{\min}^{\mathrm{C,g}}$、$P_{\max}^{\mathrm{C,g}}$ 分别为 A-CAES 电站最小、最大发电功率。

(2)待机工况

$$P_{\min}^{\mathrm{C,g}} \le R_t^{\mathrm{C,e}} \le P_{\max}^{\mathrm{C,g}} \tag{7}$$

(3)发电工况

$$0 \le R_t^{\mathrm{C,e}} \le P_{\max}^{\mathrm{C,g}} - P_t^{\mathrm{C,g}} \tag{8}$$

2.3 灵活爬坡价值

A-CAES 电站具有良好的爬坡特性，综合考虑运行状态、功率边界、动态特性等多因素影响[18]，将 A-CAES 灵活爬坡价值表达为图 2 所示。图 2 中，横坐标轴表示某时刻 A-CAES 压缩/发电功率，纵坐标轴表示上/下爬坡调节容量。A-CAES 实际运行于 D_1—D_3 段、D_4—D_6 段与 O 点，分别对应于压缩、发电、停机工况，实线围成的区域表示 A-CAES 电站所有可能的灵活爬坡调节范围。

以 A-CAES 运行于压缩工况 D_2 点为例对图 2 进行说明，A-CAES 可以通过增大压缩功率(运行于 D_1—D_2 段)来提供下爬坡调节，由于最大压缩功率的限制，此时 A-CAES 最大调节量为 $|B_1D_2|$。A-CAES 可以通过减小压缩功率(运行于 D_2—D_3 段)来提供上爬坡调节，由于最小压缩功率的限制，此时 A-CAES 最大调节量为 $|B_2D_2|$；A-CAES 可以转为停机工况(运行于 O 点)提供上爬坡调节，此时 A-CAES 调节量固定为 $|B_3D_2|$；此外，A-CAES 可

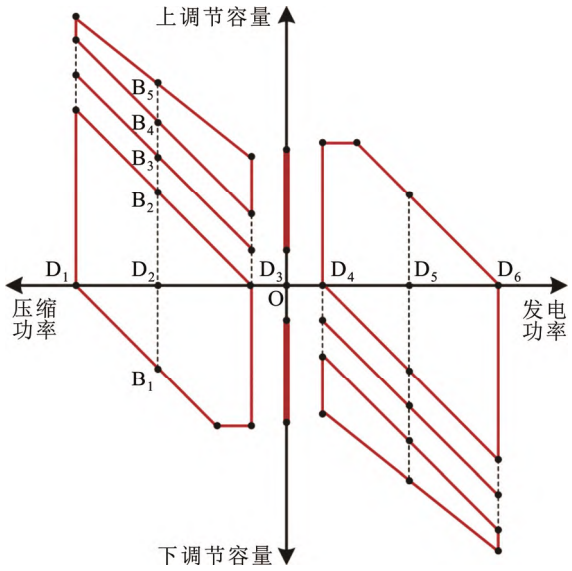

图 2 A-CAES 灵活爬坡调节范围四象限示意图

Fig.2 Schematic diagram of A-CAES four-quadrant flexible ramping adjustment range

以转为发电工况提供上爬坡调节，受爬坡率、工况转换时间、调节时间的限制，此时 A-CAES 无法在 5 min 之内转为最大发电功率(D_6 点)运行，A-CAES 最大调节量为 $|B_5D_2|$。与图 2 相对应的 A-CAES 灵活爬坡价值表达如下文所述。

(1)压缩工况

$$R_t^{\mathrm{C},+} \in \left\{x \mid 0 \le x \le P_t^{\mathrm{C,c}} - P_{\min}^{\mathrm{C,c}}\right\} \cup \left\{x \mid x = P_t^{\mathrm{C,c}}\right\} \cup \left\{x \mid P_t^{\mathrm{C,c}} + P_{\min}^{\mathrm{C,g}} \le x \le P_t^{\mathrm{C,c}} + \min\left(\Delta t_{\mathrm{c2g}} r^{\mathrm{C,g}} + P_{\min}^{\mathrm{C,g}}, P_{\max}^{\mathrm{C,g}}\right)\right\} \tag{9}$$

$$0 \le R_t^{\mathrm{C},-} \le P_{\max}^{\mathrm{C,c}} - P_t^{\mathrm{C,c}} \tag{10}$$

式中：$R_t^{\mathrm{C},+}$、$R_t^{\mathrm{C},-}$ 分别为 A-CAES 电站在时段 t 提供的正、负灵活爬坡容量；Δt_{c2g} 为由压缩工况转为发电工况后，可用于发电爬坡的时间；$r^{\mathrm{C,g}}$ 为发电工况爬坡速率；$P_{\max}^{\mathrm{C,c}}$ 为 A-CAES 电站最大压缩功率。

(2)待机工况

$$P_{\min}^{\mathrm{C,g}} \le R_t^{\mathrm{C},+} \le \min\left(\Delta t_{\mathrm{o2g}} r^{\mathrm{C,g}} + P_{\min}^{\mathrm{C,g}}, P_{\max}^{\mathrm{C,g}}\right) \tag{11}$$

$$P_{\min}^{\mathrm{C,c}} \le R_t^{\mathrm{C},-} \le \min\left(\Delta t_{\mathrm{o2c}} r^{\mathrm{C,c}} + P_{\min}^{\mathrm{C,c}}, P_{\max}^{\mathrm{C,c}}\right) \tag{12}$$

式中：Δt_{o2g} 表示由停机工况转为发电工况后，可以用于发电爬坡的时间；Δt_{o2c} 表示由停机工况转为压缩工况后，可以用于压缩爬坡的时间；$r^{\mathrm{C,c}}$ 表示压缩工况爬坡速率。

(3)发电工况

$$0 \le R_t^{\mathrm{C},+} \le P_{\max}^{\mathrm{C,g}} - P_t^{\mathrm{C,g}} \tag{13}$$

$$R_t^{\mathrm{C},-}\in\left\{x\mid 0\le x\le P_t^{\mathrm{C,g}}-P_{\min}^{\mathrm{C,g}}\right\}\cup\left\{x\mid x=P_t^{\mathrm{C,g}}\right\}\cup$$
$$\left\{x\mid P_t^{\mathrm{C,g}}+P_{\min}^{\mathrm{C,c}}\le x\le P_t^{\mathrm{C,g}}+\min\left(\Delta t_{\mathrm{g2c}}r^{\mathrm{C,c}}+P_{\min}^{\mathrm{C,c}},P_{\max}^{\mathrm{C,c}}\right)\right\}\tag{14}$$

式中：Δt_{g2c} 表示由发电工况转为压缩工况后，可以用于压缩爬坡的时间。为表述方便，式(4)—(14)中未区分不同的 A-CAES 电站，且考虑的压缩功率区间为连续区间。考虑电站压缩阶段存在不连续调节区间时所能提供的爬坡调节范围详见附录 A。

2.4　惯量支撑与一次调频价值

与电化学储能不同，A-CAES 发电特性类似于燃气轮机，充电特性类似于大型电动机。相较于新能源与电化学储能等虚拟惯量机组，A-CAES 可提供更多的主动支撑能力，在惯量支撑方面具有显著优势；相比于传统火电机组，A-CAES 基本不受启停时间约束，运行计划更为灵活。处于发电工况时，A-CAES 可以提供与燃气轮机相当的惯量与调频价值，含 A-CAES 发电的新能源高占比电网频率响应模型如图 3 所示。

图 3 中，$\Delta P_{\mathrm{epd}}(s)$ 为预想有功功率扰动；$H_{\mathrm{W}}(s)$、$H_{\mathrm{P}}(s)$、$H_{\mathrm{G}}(s)$ 分别为风电场、光伏电站和火电机组的传递函数；$H_{\mathrm{Eg}}(s)$ 为发电工况下 A-CAES 的传递函数；$G_{\mathrm{ine}}(s)$ 为系统惯性响应传递函数；k_{L} 为负荷频率调节系数；$P_{\mathrm{LN}}^{\mathrm{base}}$ 为额定频率情况下的负荷值；$\Delta f^*(s)$为系统频率变化量，上标*表示标幺值，下文同理；图中有五角星标注的为 A-CAES 参与的频率响应环节[19]。图 3 对应的频率响应表达式为：

$$\Delta f^*(s)=\frac{G_{\mathrm{ine}}(s)\Delta P_{\mathrm{eqd}}(s)}{1-G_{\mathrm{ine}}(s)\left(\begin{array}{l}H_{\mathrm{W}}(s)+H_{\mathrm{P}}(s)+\\H_{\mathrm{Eg}}(s)+H_{\mathrm{G}}(s)+k_{\mathrm{L}}P_{\mathrm{LN}}^{\mathrm{base}}\end{array}\right)}\tag{15}$$

$$\begin{cases}G_{\mathrm{ine}}(s)=\dfrac{\Delta f^*(s)}{\Delta P_{\mathrm{Gm}}^*(s)-\Delta P_{\mathrm{Ge}}^*(s)}=\dfrac{1}{2(Hs+D)}\\[2ex]H_{\mathrm{G}}(s)=-\dfrac{\Delta P_{\mathrm{Gm}}^*(s)}{\Delta f^*(s)}=\dfrac{K_{\mathrm{G}}^{\mathrm{P}}+K_{\mathrm{G}}^{\mathrm{I}}/s}{1+\mu_{\mathrm{G}}\left(K_{\mathrm{G}}^{\mathrm{P}}+K_{\mathrm{G}}^{\mathrm{I}}/s\right)}\\[2ex]H_{\mathrm{W}}(s)=-\dfrac{\Delta P_{\mathrm{W}}^*(s)}{\Delta f^*(s)}=K_{\mathrm{W1}}+sK_{\mathrm{W2}}\\[2ex]H_{\mathrm{P}}(s)=-\dfrac{\Delta P_{\mathrm{P}}^*(s)}{\Delta f^*(s)}=K_{\mathrm{P1}}+sK_{\mathrm{P2}}\\[2ex]H_{\mathrm{Eg}}(s)=-\dfrac{\Delta P_{\mathrm{Eg}}^*(s)}{\Delta f^*(s)}=\dfrac{K_{\mathrm{E}}^{\mathrm{P}}+K_{\mathrm{E}}^{\mathrm{I}}/s}{1+\mu_{\mathrm{E}}\left(K_{\mathrm{E}}^{\mathrm{P}}+K_{\mathrm{E}}^{\mathrm{I}}/s\right)}\end{cases}\tag{16}$$

式中：ΔP_{Gm}^* 为同步发电机机械功率变化量；ΔP_{Ge}^* 为同步发电机电磁功率变化量；H 为同步发电机惯性时间常数；D 为同步发电机阻尼系数；$K_{\mathrm{G}}^{\mathrm{P}}$、$K_{\mathrm{G}}^{\mathrm{I}}$ 分别为火电机组频率响应比例系数与积分系数；μ_{G} 为火电机组调差系数；$\Delta P_{\mathrm{W}}^*(s)$ 为风电场功率变化量；K_{W1} 和 K_{W2} 分别为风电场一次调频系数和惯量响应系数；$\Delta P_{\mathrm{P}}^*(s)$ 为光伏电站功率变化量；K_{P1} 和 K_{P2} 分别为光伏电站一次调频系数和惯量响应系数；$\Delta P_{\mathrm{Eg}}^*(s)$ 为 A-CAES 电站功率变化量；$K_{\mathrm{E}}^{\mathrm{P}}$、$K_{\mathrm{E}}^{\mathrm{I}}$ 分别为 A-CAES 频率响应比例系数与积分系数；μ_{E} 为 A-CAES 调差系数。需要说明的是，为便于表述，式(16)为各资源频率响应函数的一般形式，若系统中存在多台机组，需要增加对应通路。对式(15)采用等效降阶、合并简化及拉氏反变换处理，可以得出最大频率变化率、稳态频差与最大频差的解析式，并将其应用于 3.2 节“频率安全约束”，具体可参考文献[20]。处于压缩工况时，A-CAES 可以提供类似电化学储能的调频价值，不再赘述。

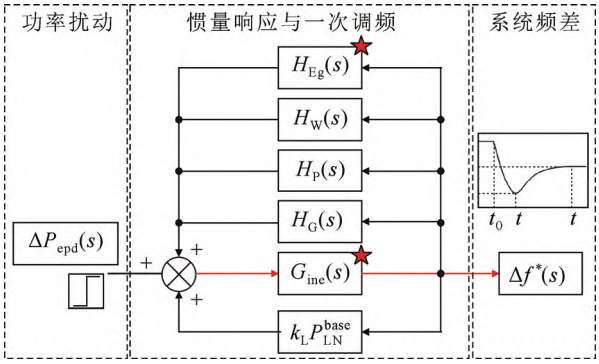

图 3　计及 A-CAES 发电的电网动态频率响应模型

Fig.3　Dynamic frequency response model of power grid including A-CAES generation

3　大规模 A-CAES 多阶段规划模型

3.1　上层 A-CAES 优化规划模型

(1)目标函数

本文设定 A-CAES 电站由电网建设并管理，优化规划目标为全寿命周期经济性成本最小：

$$\min C_{\mathrm{total}}=C_{\mathrm{con}}+C_{\mathrm{om}}+C_{\mathrm{op}}-B_{\mathrm{sal}}\tag{17}$$

式中：C_{total} 为经过折现的总成本；C_{con} 为 A-CAES 电站建设成本；C_{om} 为 A-CAES 电站的维护成本；C_{op} 为电网运行成本，其大小既受规划结果的影响，又与电网调度运行方式有关；B_{sal} 为规划期结束时的设备残值。

①建设成本

$$C_{\text{con}}=\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{1}{(1+\gamma)^{T_{S_i}}}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}(c_{\text{con},k}V_k^{i,j})\right) \tag{18}$$

式中：γ 为折现率；T_{S_i} 为 S_i 建设阶段初始年；$c_{\text{con},k}$ 为 k 型机组的建设单价。

②维护成本

$$C_{\text{om}}=\sum_{y=1}^{T_{\text{end}}}\left(\frac{1}{(1+\gamma)^{y}}\sum_{k=1}^{K}(c_{\text{fm},k}V_k^{y}+c_{\text{vm},k}P_{\text{vm},k}^{y})\right) \tag{19}$$

式中：T_{end} 为规划结束年；$c_{\text{fm},k}$ 与 $c_{\text{vm},k}$ 分别为 k 型机组的固定维护成本系数与浮动维护成本系数；V_k^y 为第 y 年 k 型机组的数量；$P_{\text{vm},k}^y$ 为第 y 年 k 型机组的总出力情况。

③运行成本

$$C_{\text{op}}=\sum_{y=1}^{T_{\text{end}}}\left(\frac{1}{(1+\gamma)^{y}}\sum_{n=1}^{N_{\text{typ}}}(\kappa_n D_{\text{op}}C_{\text{op},n})\right) \tag{20}$$

式中：N_{typ} 为典型日的种类数；κ_n 为 n 类典型日在一年中所占的比例；D_{op} 为一年总天数；$C_{\text{op},n}$ 为 n 类典型日的调度成本，是调度层的目标函数。

④设备残值

在规划周期末，仍有部分设备未到达退役年限，需要计算其折旧后的设备残值，本文采用年限平均法计算设备折旧情况[21]，即：

$$B_{\text{sal}}=\frac{1}{(1+\gamma)^{T_{\text{end}}}}\sum_{l=1}^{N_{\text{sal}}}\left(c_{\text{con},l}\left(1-\frac{L_{\text{use},l}(1-\delta_l)}{L_{\text{exp},l}}\right)\right) \tag{21}$$

式中：N_{sal} 为规划期末未达退役年限的设备总数；$L_{\text{exp},l}$、$L_{\text{use},l}$ 分别为设备 l 的期望使用寿命与实际使用寿命；δ_l 为设备 l 的净残值率。

(2)约束条件

①地理位置限制

$$\boldsymbol{V}_{\cdot,j}\le\bar{\boldsymbol{V}}_{\cdot,j},\ j\in\{1,2,\cdots,M\} \tag{22}$$

式中：$\boldsymbol{V}_{\cdot,j}$、$\bar{\boldsymbol{V}}_{\cdot,j}$ 分别表示 G_j 点全寿命周期规划的 A-CAES 机组总数与数量上限。

②投资成本限制

$$C_{\text{con}}+C_{\text{om}}-B_{\text{sal}}=C_{\text{ins}}\le\bar{C}_{\text{ins}} \tag{23}$$

式中：C_{ins}、$\bar{C}_{\text{ins}}$ 分别表示 A-CAES 电站投资成本及上限。

3.2 下层典型日优化调度模型

调度层根据规划层确定的 A-CAES 配置方案，求解各典型日下电网的机组组合与经济调度方式，并将求解结果返回规划层。

(1)目标函数

日前优化调度目标为电网运行成本最小，即：

$$\min C_{\text{op,da}}=C_{\text{G,r}}+C_{\text{G,re}}+C_{\text{G,rl}}+C_{\text{G,ss}}+C_{\text{N,w}} \tag{24}$$

$$\begin{cases}C_{\text{G,r}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}\left(a_i^{\text{G}}P_{i,t}^{\text{G}}\Delta t+b_i^{\text{G}}u_{i,t}^{\text{G}}\right)\\ C_{\text{G,re}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}c_i^{\text{G}}R_{i,t}^{\text{G,E}}\Delta t\\ C_{\text{G,rl}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}\left(\gamma_i^{\text{G,+}}R_{i,t}^{\text{G,+}}+\gamma_i^{\text{G,-}}R_{i,t}^{\text{G,-}}\right)\Delta t\\ C_{\text{G,ss}}=\sum_{t=1}^{T-1}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}\frac{\chi_i^{\text{G,+}}}{2}\left(\begin{matrix}\left(u_{i,t+1}^{\text{G}}-u_{i,t}^{\text{G}}\right)+\\ \left|u_{i,t+1}^{\text{G}}-u_{i,t}^{\text{G}}\right|\end{matrix}\right)+\\ \qquad\sum_{t=1}^{T-1}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}\frac{\chi_i^{\text{G,-}}}{2}\left(\begin{matrix}\left(u_{i,t}^{\text{G}}-u_{i,t+1}^{\text{G}}\right)+\\ \left|u_{i,t}^{\text{G}}-u_{i,t+1}^{\text{G}}\right|\end{matrix}\right)\\ C_{\text{N,w}}=c_{\text{pen}}\sum_{t=1}^{T}\left(\begin{matrix}\sum_{n=1}^{N_{\text{W}}}\left(P_{n,t}^{\text{W,f}}-P_{n,t}^{\text{W}}\right)+\\ \sum_{p=1}^{N_{\text{P}}}\left(P_{p,t}^{\text{P,f}}-P_{p,t}^{\text{P}}\right)\end{matrix}\right)\Delta t\end{cases} \tag{25}$$

式中：$C_{\text{op,da}}$、$C_{\text{G,r}}$、$C_{\text{G,re}}$、$C_{\text{G,rl}}$、$C_{\text{G,ss}}$ 和 $C_{\text{N,w}}$ 分别为系统日前运行成本、火电运行成本、火电备用成本、火电灵活爬坡调节成本、火电开关机成本和新能源弃电惩罚成本；T 为总调度时段数；N_{G}、N_{W}、N_{P} 分别为火电机组、风电场与光伏电站的数量；a_i^{G}、b_i^{G} 分别为火电机组 i 的购电成本系数；$P_{i,t}^{\text{G}}$ 为火电机组 i 在 t 时段的有功出力；$\Delta t=1\ \text{h}$ 为日前调度阶段的单位调度时长；$u_{i,t}^{\text{G}}$ 为火电机组 i 在 t 时段的启停状态；c_i^{G} 为火电机组 i 的单位事故备用成本；$R_{i,t}^{\text{G,E}}$ 为火电机组 i 在 t 时段的事故备用容量；$\gamma_i^{\text{G,+}}$、$\gamma_i^{\text{G,-}}$ 分别为火电机组 i 的单位正、负灵活爬坡调节成本；$R_{i,t}^{\text{G,+}}$、$R_{i,t}^{\text{G,-}}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段的正、负灵活爬坡调节容量；$\chi_i^{\text{G,+}}$、$\chi_i^{\text{G,-}}$ 分别为火电机组 i 的单次开关机成本；c_{pen} 为弃电惩罚成本系数；$P_{n,t}^{\text{W,f}}$、$P_{n,t}^{\text{W}}$ 分别为风电场 n 在 t 时段的预测及实际出力；$P_{p,t}^{\text{P,f}}$、$P_{p,t}^{\text{P}}$ 分别为光伏电站 p 在 t 时段的预测及实际出力。为表述方便，式(25)略去了表示典型日类型的符号“n”。

(2)常规约束

典型日优化调度模型考虑的常规约束有：火电机组运行约束[22](出力上下限约束、启停机约束、爬坡率约束)、A-CAES 常规运行约束[16](运行工况约束、储气室、蓄热换热器约束)、风电出力约束、光伏出力约束、系统功率平衡约束[22]、系统事故备用约束[16]等，相关研究已较为成熟，在此不再赘述。

有关 A-CAES 的变工况出力约束、事故备用容

量约束、灵活爬坡调节范围约束、惯量与一次调频约束已在第 2 章详细介绍，分别对应于 2.1 节—2.4 节。面向高比例新能源接入引发的调峰压力大、爬坡需求高、转动惯量低、调频能力弱等问题，引入保供促消约束、灵活爬坡需求约束[23]、频率安全约束[20]，如下文所示。

(3)保供促消约束

$$\begin{cases}\sum_{t=1}^{T}P_t^{\mathrm{d}}/\sum_{t=1}^{T}P_t^{\mathrm{load}}\le\gamma_1\\ \sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{W}}}P_{n,t}^{\mathrm{W}}+\sum_{p=1}^{N_{\mathrm{P}}}P_{p,t}^{\mathrm{P}}\right)/\sum_{t=1}^{T}\left(\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{W}}}P_{n,t}^{\mathrm{W,f}}+\sum_{p=1}^{N_{\mathrm{P}}}P_{p,t}^{\mathrm{P,f}}\right)\ge\gamma_2\end{cases}\tag{26}$$

式中：γ_1、γ_2 分别表示缺电率和消纳率的限值；P_t^{d}、P_t^{load} 分别表示系统在时段 t 的切负荷功率和负荷需求功率。

(4)灵活爬坡需求约束

$$\sum_{i,e}(R_{i,t}^{\mathrm{G},+}+R_{e,t}^{\mathrm{C},+})\ge R_t^{\mathrm{FR},+}\tag{27}$$

$$\sum_{i,e}(R_{i,t}^{\mathrm{G},-}+R_{e,t}^{\mathrm{C},-})\ge R_t^{\mathrm{FR},-}\tag{28}$$

式中：$R_t^{\mathrm{FR},+}$、$R_t^{\mathrm{FR},-}$ 分别表示系统在 t 时刻的上、下灵活爬坡调节需求量，如附录 A 图 A4 所示，计算方法为：

$$R_t^{\mathrm{FR},+}=\max\left(0,\min\begin{pmatrix}L_{t+1}^{\mathrm{N}}+r_{t+1}^{+}-(L_t^{\mathrm{N}}-r_t^{-}),\\ r_{t+1}^{+}+r_t^{-}\end{pmatrix}\right)\tag{29}$$

$$R_t^{\mathrm{FR},-}=\max\left(0,\min\begin{pmatrix}L_t^{\mathrm{N}}+r_t^{+}-(L_{t+1}^{\mathrm{N}}-r_{t+1}^{-}),\\ r_t^{+}+r_{t+1}^{-}\end{pmatrix}\right)\tag{30}$$

式中：L_t^{N} 表示系统 t 时刻的净负荷预测值；r_t^{+}、r_t^{-} 分别表示 t 时刻预留的向上、向下安全裕度。

(5)频率安全约束

系统频率安全约束包括最大频率变化率约束、稳态频差约束与最大频差约束，即：

$$\begin{cases}\left|v_{\mathrm{ini},t}^{*}\right|\le v_{\mathrm{ini,lim}}^{*}\\ \left|\Delta f_{\mathrm{std},t}^{*}\right|+\Delta f_{\mathrm{dz}}^{*}\le\Delta f_{\mathrm{std,lim}}^{*}\\ \left|\Delta f_{\mathrm{max},t}^{*}\right|+\Delta f_{\mathrm{dz}}^{*}\le\Delta f_{\mathrm{max,lim}}^{*}\end{cases}\tag{31}$$

式中：$v_{\mathrm{ini},t}^{*}$、$\Delta f_{\mathrm{std},t}^{*}$、$\Delta f_{\mathrm{max},t}^{*}$ 分别为 t 时刻系统受到预想功率扰动时的最大频率变化率、稳态频差与最大频差；$\Delta f_{\mathrm{dz}}^{*}$ 为调频死区；$v_{\mathrm{ini,lim}}^{*}$、$\Delta f_{\mathrm{std,lim}}^{*}$、$\Delta f_{\mathrm{max,lim}}^{*}$ 分别为最大频率变化率限值、稳态频差限值与最大频差限值。

3.3　求解方法

本文采用粒子群算法进行求解，将系统全寿命周期经济性成本设置为适应度函数，其中电网运行成本是由各阶段下各典型日运行成本加权计算而来的。上层模型生成各阶段各地理点的 A-CAES 电站规划方案并传递给下层模型，下层模型中最大频差约束具有高阶非线性，难以求解，对此本文采用“内部优化、外部验证”的两阶段迭代求解方法，除此之外，其余约束条件将被转化为混合整数线性规划问题，可以采用 Gurobi 9.5.1 求解器进行求解[24]。

4　算例分析

4.1　算例参数设置

本文以改进 IEEE-118 节点系统作为研究对象进行算例分析，拓扑如附录 A 图 A5 所示，其中 G1—G15 为常规火电机组，W1—W20 为风电场，P1—P10 为光伏电站，E1—E9 为 A-CAES 电站可规划布点。火电机组、风电场、光伏电站与系统参数参考文献[20]；选择目前常见的压缩空气储能机型作为待选方案，其经济技术参数如附录 A 表 A1 所示。

在规划层，考虑到文献[25]所提出的源荷发展预测结果，拟定各阶段的源荷增长趋势如附录 A 表 A2 所示，由此体现中长期源荷变化对指导电力规划的重要意义。按照本文所提多阶段规划架构，将规划周期划分为 4 个阶段，各阶段持续时间为 10 年。在调度层，基于 4 类典型日的源荷数据，安排系统机组组合与经济调度计划，各典型日源荷出力如附录 A 图 A6 所示。

4.2　多阶段规划结果分析

为验证本文所提多阶段规划方法的有效性，设计算例 EP1，包含场景 A—C。场景 A：每 10 年规划一次储能电站，共规划 4 次。场景 B：每 20 年规划一次储能电站，共规划 2 次。场景 C：仅在第 1 年初规划 1 次。求解场景 A—C 的规划方案，所得各阶段 A-CAES 规划结果如图 4 所示，各场景的全寿命周期成本、储能投资成本、储能各阶段成本与系统各阶段总成本分别如图 5(a)、(b)、(c)、(d)所示。

由图 4 可知，在规划容量上，随着规划周期的增加，场景 A—C 规划总容量逐渐减少，分别为 1 850、1 810、1 660 MW。在容量等级选择上，大容量 A-CAES(300 MW 级与 250 MW 级)由于具备较低的单位成本与较高的转换效率，被选作规划方案的主力机型，而中小容量 A-CAES(100 MW 级与 60 MW 级)的单机容量与成本较小，配置更加灵活，因此成为配置方案的细化选择。

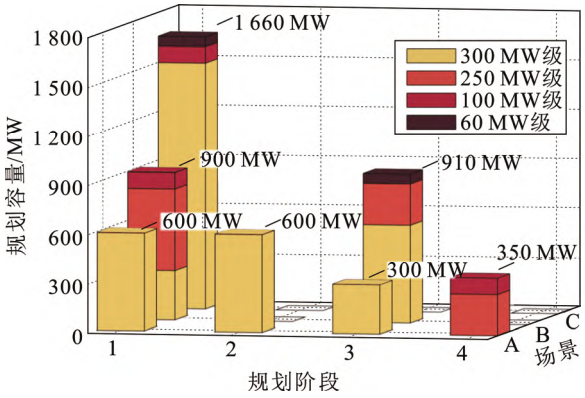

图 4 算例 EP1 规划结果

Fig.4 Planning result of EP1

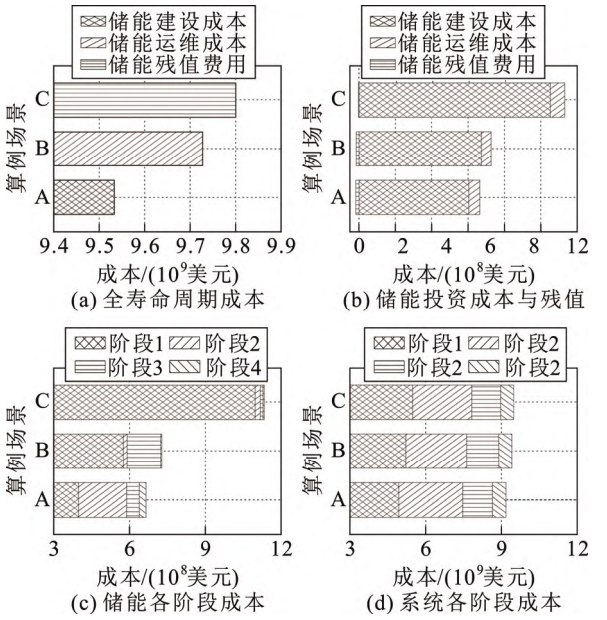

图 5 算例 EP1 经济性分析

Fig.5 Economical analysis of EP1

由图 5(a)可知，场景 A 全寿命周期成本最小，相较于场景 B 与场景 C 分别减少了 2.33×10^8、3.21×10^8 美元。由图 5(b)可知，虽然场景 C 规划总容量最少，但其储能建设成本最高，规划末期残值费用最低，这是因为场景 C 仅在初始年进行规划，存在超前投资的问题，而场景 A、B 采用分期规划，节省了储能投资成本，在规划末期仍保有一定的残值费用。结合图 4 可知，场景 A 与场景 B 规划的总容量相近，但是场景 A 配置 300 MW 级电站更多，且场景 A 整体建设时序靠后，因此场景 A 的储能建设成本与残值费用均优于场景 B。

由图 5(c)、(d)可知，在规划初期(S_1 阶段)，场景 A、B 避免了场景 C 由于超前投资而产生较高的储能建设成本与运维成本，其中场景 A 的储能成本仅为场景 C 的 36.38%。同时，由于场景 A 建设的 A-CAES 电站较少，电网需要向发电商多支付一定的费用，多出来的运行成本可以被节约的储能投资成本覆盖，使得该阶段场景 A 的总成本仍低于场景 C；在规划中期(S_2、S_3 阶段)，各场景下电网运行成本相差不大，而场景 A 与场景 B 需要支付一定的储能投资成本，使得 2 场景的系统总成本略有升高；在规划末期(S_4 阶段)，各场景均已完成 A-CAES 电站建设，此阶段的系统总成本较为接近。

由上述分析可知，场景 A、B 考虑电网调节需求变化进行多阶段规划，可以避免因超前投资造成的储能容量冗余，节省储能投资成本。而场景 A 考虑的多阶段规划方案更为精细，能够进一步提升系统全寿命周期经济性。

4.3 计及变工况特性的规划结果分析

为验证在 A-CAES 优化规划过程中考虑变工况特性的必要性，设计算例 EP2，包含场景 A、D 与 D′。场景 A：即本文模型所得规划结果。场景 D：不考虑 A-CAES 变工况特性，假定 A-CAES 电站运行效率为固定值(即设计工况效率)。场景 D′：根据场景 D 的规划结果，采用本文的变工况模型重新计算 A-CAES 电站的经济性成本。场景 A 与场景 D 规划结果如图 6 所示。场景 A、D 与 D′的经济性对比分析如图 7 所示。

由图 6 与图 7 可知，场景 D 假定 A-CAES 运行效率为固定值，而非场景 A 的变工况效率，则场景 D 下 A-CAES 电站具有更为优越的价值比，因此场景 D 的规划容量大于场景 A，为 1 960 MW，以期减少电网运行成本。然而，场景 D 中对于 A-CAES 效率估计过于乐观，将场景 D 的规划结果代入变工况模型中时，发现其需要付出与场景 A 相近的电网运行成本，且需要多支付 5.63%的储能投资成本，导致总成本高于场景 A。由此可知：场景 D 不考虑 A-CAES 变工况特性，所得到的规划结果并非最优，全寿命周期经济性分析亦不准确。而本文模型可以考虑 A-CAES 电站运行工况，确定更优的规划结果，提高系统经济性。

进一步针对变工况特性对系统调度计划的影响开展分析，选取 S_4 阶段典型日 1 的调度结果进行对比，场景 D 与 D′的 A-CAES 电站出力计划如图 8 所示，其中压缩工况为负值，发电工况为正值，火电机组出力计划如附录 A 图 A7 所示。

由图 8 可知，场景 D 由于不考虑变工况特性，

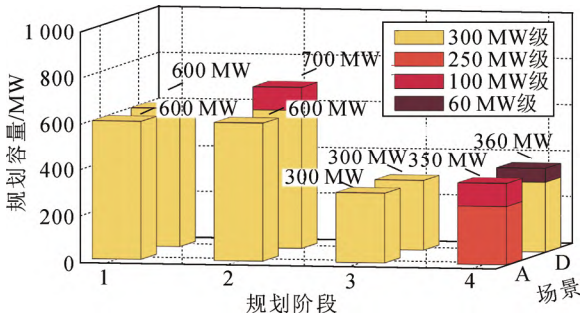

图 6　算例 EP2 规划结果

Fig.6　Planning result of EP2

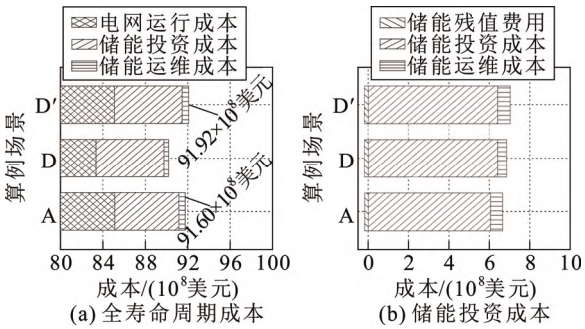

图 7　算例 EP2 经济性分析

Fig.7　Economical analysis of EP2

A-CAES 电站整体倾向于采用低负荷、长时充放电的方式运行，发电出力多维持在 40%~60%区间，平均工作时长为 14.5 h；而场景 D′为避免低转换效率造成的电能损耗，各 A-CAES 电站出力采用高负荷、相对短时充放电的工作状态，发电出力基本保持在 80%以上，平均工作时长为 13.125 h。

由附录 A 图 A7 可知，火电机组 G13—G15 经济性最优，基本处于满发状态；G10—G12 经济性较优，也能保证全日开机运行；G5—G9 则在负荷高峰期作为补充出力运行；而 G1—G4 经济性较差，处于停机状态。

由计算结果可知，场景 D′火电机组总出力较场景 D 增加 891.25 MWh，这是因为场景 D′考虑变工况特性，A-CAES 电站整体转换效率低于场景 D，需要火电机组增加出力，因此场景 D′中 G8 与 G12 出现不同程度的增发。而场景 D 对 A-CAES 电站效率的估计过于乐观，在实际运行过程中，存在调度计划无法完全执行的风险。

4.4　A-CAES 多应用价值量化分析

为量化评价本文所提 A-CAES 调峰-备用-爬坡-惯量多应用价值，采用场景 A 规划结果进行分析，所得结果如表 2 所示。其中，等效惯量提升因子与

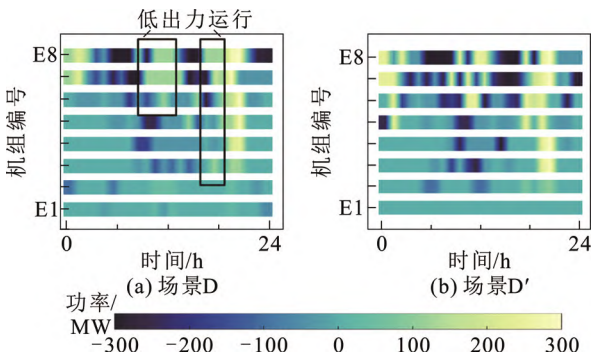

图 8　A-CAES 电站出力计划

Fig.8　Output scheduling of A-CAES station

表 2　A-CAES 多应用价值量化评价结果

Table 2　Quantified evaluation results of A-CAES's multi-application values

价值分类	表征量	数值
调峰价值	净负荷峰谷差削减量/MW	2 014.25
	净负荷峰谷差下降因子/%	49.20
备用价值	系统事故备用提供比率/%	100
爬坡价值	上爬坡调节量提供比率/%	77.16
	下爬坡调节量提供比率/%	98.32
惯量/调频价值	等效惯量提升因子/%	108.46
	稳态频率偏差下降因子/%	91.93

稳态频率偏差下降因子用于描述非传统同步机电源对电网频率支撑强度的贡献[26]，计算方法详见附录 A。预想有功扰动下电网最大频率变化率与机组运行工况如图 9 所示。

由表 2 可知，配置 A-CAES 电站后，系统净负荷峰谷差降低了 2 014.25 MW，系统中全部的事故备用与高比例的上、下爬坡调节量均由 A-CAES 电站承担。这是因为 A-CAES 具备较强的能量吞吐能力与快速功率调节能力，在调峰、备用、爬坡方面优势显著，A-CAES 电站的大规模接入可以有效减少火电机组的启停与爬坡，提供充足的备用服务，从而节约系统电能-备用购置成本。

由表 2 可知，A-CAES 电站接入后，系统等效惯量提高了 8.46%，稳态频差下降了 8.07%，结合图 9 可知，在 00:00—08:00 时段，系统净负荷需求适中，6 台火电机组处于开机状态，A-CAES 电站先发电后压缩，系统最大频率变化量维持在较低水平；在 09:00—16:00 时段，新能源出力显著增加，大部分 A-CAES 电站工作在压缩状态以充分消纳冗余电能，而此时火电机组、风电场能够提供的惯量

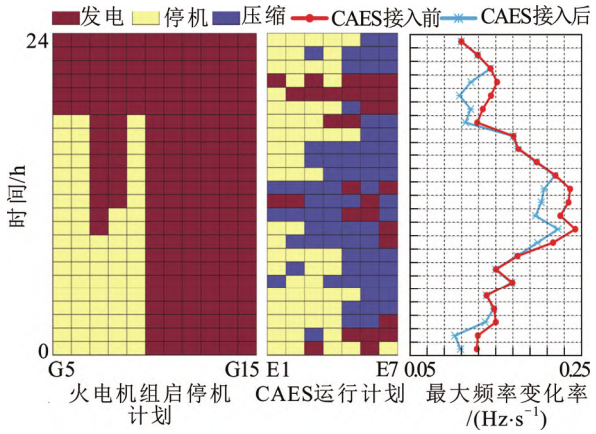

图 9 系统最大频率变化率

Fig.9 Maximum frequency change rate of system

不足，需要个别 A-CAES 电站间歇发电，从而保证系统惯量充裕；在 17:00—24:00 时段，净负荷需求较高，系统增开火电机组，惯量随之提升。

进一步针对 A-CAES 多应用价值对规划结果与全寿命周期成本的影响开展分析，分别设置 A-CAES 电站不参与调峰、备用、爬坡、惯量及调频服务的 4 类场景 E—H，所得规划结果与经济性成本如表 3 所示。

由表 3 可知，由于规划末期净负荷的峰谷差较大，不考虑 A-CAES 电站参与调峰的 E 场景将无法满足功率平衡约束，导致规划模型无解；场景 F 中 A-CAES 电站不提供事故备用服务，储能的价值比有所下降，配置容量也随之降低，同时电网需要向火电机组支付更昂贵的事故备用成本，因此场景 F 的经济成本相较于场景 A 增加了 4.21%；与场景 F 类似，场景 G 中 A-CAES 电站不提供灵活爬坡服务，导致全寿命周期成本增加了 9.93%，储能配置容量也最低；场景 H 失去了 A-CAES 电站提供的惯量支撑与一次调频能力，在某些时段需要采用大容量的机组组合方式，对系统运行经济性造成了不良影响。

综上所述，大规模先进压缩空气储能具备优异的调峰、备用、爬坡应用价值，在本文算例中，若在规划末期不考虑 A-CAES 参与调峰，将无法满足功率平衡约束而导致模型无解，因此 A-CAES 的调峰价值是 4 类价值中最重要的，按照全寿命周期成本增量对其他 3 类价值的排序依次为爬坡价值、备用价值、惯量与调频价值。

5 结论

1）大容量 A-CAES 电站由于具备较低的单位成本与较高的转换效率，被选作规划方案的主力机型，而中小容量 A-CAES 机组配置更加灵活，是规划方案的细化选择。

2）所提出的大规模 A-CAES 多阶段规划方法可避免因超前投资造成的储能容量冗余，从而有效节省储能投资成本，提升系统全寿命周期经济性。

3）在大规模 A-CAES 优化规划过程中考虑变工况特性，有效避免了对 A-CAES 电站效率的偏乐观估计，所得规划结果更优，经济性分析更准确。

4）大规模 A-CAES 具备优异的调峰、备用、爬坡、惯量应用价值。在本文算例中，配置大规模 A-CAES 电站后，系统净负荷峰谷差明显降低，系统中全部的事故备用与高比例的上、下爬坡调节量均由 A-CAES 电站承担，系统等效惯量提高了 8.46%，稳态频差下降了 8.07%。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

表 3 A-CAES 多应用价值对比

Table 3 A-CAES multi-application value comparison

参数	不同场景下的参数取值				
	A	E	F	G	H
电网运行成本/(10^8 美元)	85.13	—	89.50	94.96	85.50
储能建设成本/(10^8 美元)	6.05	—	5.59	5.72	6.03
储能运维成本/(10^8 美元)	0.60	—	0.56	0.17	0.60
残值回收费用/(10^8 美元)	0.18	—	0.19	0.14	0.18
全寿命周期成本/(10^8 美元)	91.60	—	95.46	100.70	91.95
配置容量/MW	1 850	—	1 800	1 650	1 810

参考文献 References

[1] 国家能源局. 能源转型步伐加快 我国风电太阳能发电装机超 11 亿千瓦 [EB/OL]. (2024-04-26)[2024-07-24]. https://www.nea.gov.cn/2024- 04/26/c_1310772757. htm.
National Energy Administration. Accelerating energy transition: china's wind and solar power capacity exceeds 1.1 billion kilowatts[EB/OL]. (2024-04-26)[2024-07-24]. https://www.nea.gov.cn/2024-04/26/c_1310772757.htm.

[2] 李更丰，孙少华，别朝红，等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.

[3] 国家能源局. 国家能源局公告 2024 年第 1 号[EB/OL]. (2024-01-17)[2024-07-24]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-01/17/c_1310761775.htm.
National Energy Administration. Announcement No. 1 of 2024 by the national energy administration[EB/OL]. (2024-01-17)[2024-07-24]. https://zfxxgk.nea.gov. cn/2024-01/17/c_1310761775. htm.

[4] 梅生伟，张 通，张学林，等. 非补燃压缩空气储能研究及工程实践——以金坛国家示范项目为例[J]. 实验技术与管理，2022，39(5)：1-8，14.
MEI Shengwei, ZHANG Tong, ZHANG Xuelin, et al. Research and engineering practice of non-supplementary combustion compressed air energy storage: taking Jintan national demonstration project as an example[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(5): 1-8, 14.

[5] 北极星储能网. 压缩空气储能 GWh 级项目“密布”[EB/OL]. (2024-03-04)[2024-07-24]. https://news.bjx.com.cn/html/20240304/1363935.shtml.
Polaris Energy Storage Network. GWh-scale compressed air energy storage projects “densely distributed”[EB/OL]. (2024-03-04)[2024-07-24]. https://news.bjx.com.cn/html/20240304/1363935. shtml.

[6] 刘笑驰，梅生伟，丁若晨，等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备，2023，43(10)：38-47，102.
LIU Xiaochi, MEI Shengwei, DING Ruochen, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47, 102.

[7] DING J, XU Y J, CHEN H S, et al. Value and economic estimation model for grid-scale energy storage in monopoly power markets[J]. Applied Energy, 2019, 240: 986-1002.

[8] LI W, MIAO H, LUO X, et al. Dynamic modelling and techno-economic analysis of adiabatic compressed air energy storage for emergency back-up power in supporting microgrid[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114448.

[9] XIA T, LI Y W, ZHANG N, et al. Role of compressed air energy storage in urban integrated energy systems with increasing wind penetration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 160: 112203.

[10] 虞启辉，田 利，李晓飞，等. 考虑风能不确定性的压缩空气储能容量配置及经济性评估[J]. 储能科学与技术，2021，10(5)：1614-1623.
YU Qihui, TIAN Li, LI Xiaofei, et al. Compressed air energy storage capacity configuration and economic evaluation considering the uncertainty of wind energy[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1614-1623.

[11] 李佳佳，李兴朔，魏凡超，等. 耦合火电机组的新型压缩空气储能系统技术经济性评估研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(23)：9171-9182.
LI Jiajia, LI Xingshuo, WEI Fanchao, et al. Research on techno-economic evaluation of new type compressed air energy storage coupled with thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9171-9182.

[12] YIN B X, LI Y W, MIAO S H, et al. An economy and reliability co-optimization planning method of adiabatic compressed air energy storage for urban integrated energy system[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102691.

[13] 尹斌鑫，苗世洪，李姚旺，等. 考虑变寿命特性的先进绝热压缩空气储能电站容量规划模型[J]. 电工技术学报，2020，35(3)：612-622.
YIN Binxin, MIAO Shihong, LI Yaowang, et al. A capacity planning model of advanced adiabatic compressed air energy storage plant considering lifetime varying characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 612-622.

[14] 尹斌鑫，苗世洪，李姚旺，等. 集中-分布式混合压缩空气储能电站优化规划策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(5)：53-64.
YIN Binxin, MIAO Shihong, LI Yaowang, et al. Modeling and planning strategy for centralized-distributed hybrid compressed air energy storage station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 53-64.

[15] 崔 杨，于一凡，付小标，等. 考虑多热源协同互补的含先进绝热压缩空气储能系统容量配置方法[J]. 电网技术，2024，48(10)：4195-4205.
CUI Yang, YU Yifan, FU Xiaobiao, et al. A capacity allocation method for advanced adiabatic compressed air energy storage systems considering the synergistic complementarity of multiple heat sources[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4195-4205.

[16] 李姚旺，苗世洪，尹斌鑫，等. 考虑先进绝热压缩空气储能电站备用特性的电力系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5392-5404.
LI Yaowang, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Power system optimal scheduling strategy considering reserve characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5392-5404.

[17] 黄 焰，王新超，李 峻. 300 MW 压缩空气储能系统建模仿真[J]. 能源与节能，2023(11)：59-63，69.
HUANG Yan, WANG Xinchao, LI Jun. Modeling and simulation of 300 MW compressed air energy storage system[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(11): 59-63, 69.

[18] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 电力储能用压缩空气储能系统技术要求：GB/T 43687—2024[S]. 北京：中国标准出版社，2024.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Technical requirements for compressed air energy storage system used for electrical energy storage: GB/T 43687—2024[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2024.

[19] 赵 博，成昕雨，李佳瑶，等. 基于储能型柔性直流励磁系统的抽水蓄能机组调频控制策略[J/OL]. 高电压技术，2024：1-17 [2024-08-27]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20240528.
ZHAO Bo, CHENG Xinyu, LI Jiayao, et al. Frequency regulation control strategy of pumped storage unit based on flexible DC excitation system with energy storage[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-17[2024-08-27]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240528.

[20] 王廷涛，苗世洪，姚福星，等. 计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统日前-日内联合调度策略[J]. 中国电机工程学报，2024，44(7)：2590-2603.
WANG Tingtao, MIAO Shihong, YAO Fuxing, et al. Day-ahead and intra-day joint dispatch strategy of high proportion wind power system considering dynamic frequency response constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2590-2603.

[21] 李军徽，贾才齐，朱星旭，等. 降低火电调频损耗的混合储能系统容量优化配置双层模型[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3965-3976.
LI Junhui, JIA Caiqi, ZHU Xingxu, et al. Dual-layer model for capacity optimization of hybrid energy storage system to reduce thermal power frequency modulation loss[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3965-3976.

[22] 高正男，胡姝博，金 田，等. 考虑传输线动态增容风险的电力系统日前调度模型[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3215-3225.
GAO Zhengnan, HU Shubo, JIN Tian, et al. Day-ahead power system scheduling model considering transmission line dynamic capacity ex-

pansion risk[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3215-3225.

[23] SREEKUMAR S, SHARMA K C, BHAKAR R. Multi-interval solar ramp product to enhance power system flexibility[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(1): 170-179.

[24] 杨志豪，苗世洪，涂青宇，等. 考虑多品位能源互补的综合能源系统分级规划策略[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1457-1467.
YANG Zhihao, MIAO Shihong, TU Qingyu, et al. Hierarchical planning strategy for integrated energy system considering the complementation of multi-grade energy[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1457-1467.

[25] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研究报告[R]. 北京：全球能源互联网发展合作组织，2021.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Report on China's carbon neutrality by 2060[R]. Beijing, China: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2021.

[26] 徐　政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3805-3819.
XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3805-3819.

王佳旭
2000—，男，硕士生
主要从事先进压缩空气储能系统优化规划与运行方面的研究工作
E-mail：M202271920@hust.edu.cn

WANG Jiaxu

苗世洪(通信作者)
1963—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统智能调度与自动化、压缩空气储能建模及应用、微电网和配电网新技术等方面研究工作
E-mail: shmiao@hust.edu.cn

MIAO Shihong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-09-30　修回日期　2024-12-10　　编辑　程子丰